

Primljen / Received: 6.5.2019.

Ispravljen / Corrected: 1.6.2019.

Prihvaćen / Accepted: 3.6.2019.

Dostupno online / Available online: 31.8.2019.

Završni sloj asfaltnoga kolnika s dodatkom reciklirane gume

Autori:



Doc.dr.sc. **Miroslav Šimun**, dipl.ing.građ.
Tehničko veleučilište u Zagrebu
Graditeljski odjel
msimun@tvz.hr



Sandra Mihalina, mag.ing.aedif.
Tehničko veleučilište u Zagrebu
Graditeljski odjel
sandra.mihalina@tvz.hr

Prethodno priopćenje

Miroslav Šimun, Sandra Mihalina

Završni sloj asfaltnoga kolnika s dodatkom reciklirane gume

Nakon što se prestanu upotrebljavati za prometovanje po kolnicima, umjesto da se odlažu na odlagalište otpada automobilske se gume, mogu koristiti u cestogradnji kao dodatak bitumenskoj mješavini. Dodavanjem reciklirane gume poboljšavaju se svojstva bitumena te se postižu bolja eksploatacijska svojstva asfalta (manja osjetljivost na djelovanje vode i pojavu pukotina te dobre hvatljivosti vozne površine). Nakon jedanaest godina eksploatacije analizirani su rezultati na trima pokusnim dionicama asfaltnoga kolnika s dodatkom gume u bitumenu i bez njega. Analizirana su svojstva asfalta s različitim udjelom reciklirane gume u cestograđevnome i polimerom modificiranome bitumenu.

Ključne riječi:

reciklirana guma, bitumenska mješavina, indirektna vlačna čvrstoća asfalta

Research Paper

Miroslav Šimun, Sandra Mihalina

Asphalt pavement surface course with recycled rubber

After the end of their use in road traffic, car tires can be used in road construction as an addition to bitumen mixtures. By adding recycled rubber, bitumen properties are improved and better behaviour of placed asphalt is achieved (lower sensitivity to water action and cracking, and good skid resistance). Results obtained on three asphalt-pavement test sections, with and without addition of rubber in bitumen, are analysed after eleven years of road use. Characteristics of asphalt with different proportions of recycled rubber in bitumen and polymer modified bitumen are analysed.

Key words:

recycled rubber, bituminous mixture, indirect tensile strength of asphalt

Vorherige Mitteilung

Miroslav Šimun, Sandra Mihalina

Deckschicht der Asphaltfahrbahn mit recyceltem Gummi

Nachdem Autoreifen nicht mehr für den Straßenverkehr verwendet werden, können sie im Straßenbau als Zusatz zur bituminösen Mischung verwendet werden, anstatt auf einer Mülldeponie entsorgt zu werden. Der Zusatz von recyceltem Gummi verbessert die Eigenschaften von Bitumen und es werden bessere Nutzungseigenschaften von Asphalt (geringere Anfälligkeit für Wasser und Risse und gute Griffigkeit der befahrbaren Oberfläche) erzielt. Nach elfjähriger Nutzung wurden die Ergebnisse der drei Teststrecken für Asphaltfahrbahnen mit und ohne Gummizusatz im Bitumen analysiert. Die Eigenschaften des Asphalts mit unterschiedlichen Gehalten an recyceltem Gummi im Straßenbau und im polymermodifizierten Bitumen wurden analysiert.

Schlüsselwörter:

recyceltes Gummi, bituminöse Mischung, indirekte Zugfestigkeit von Asphalt

1. Uvod

U 21. stoljeću dobrodošla je svaka nova tehnologija primjene materijala koja će potaknuti recikliranje bilo koje vrste otpada [1]. Automobilsku je gumu nakon upotrebe moguće ponovno koristiti kao građevni materijal u obliku dodatka bitumenskim mješavinama za vozne površine kolnika te kao materijal za izradu betonskih elemenata i sklopova [2]. Reciklaža automobilske gume spada u djelatnosti održivoga razvoja jer se od izrabljenih proizvoda stvara resurs nove vrijednosti [3]. Prema Pravilniku o gospodarenju otpadnim gumama [4], guma je svaki proizvod koji se stavlja na tržište kao samostalan proizvod ili sastavni dio drugoga proizvoda. Proces reciklaže istrošenih automobilske gume pozitivan je i s gledišta odgovornoga gospodarenja otpadom te zaštite okoliša upravo zbog činjenice što se automobilske gume proizvode u velikim količinama te se ubrajaju u vrlo problematičnu kategoriju otpada [5, 6].

S obzirom na to da se za potrebe građevinarstva koristi samo 5 % recikliranih guma, težnja je taj postotak povećati primjenom novih tehnologija i proizvoda u kojima bi se reciklirana guma mogla odgovarajuće upotrijebiti [7]. Prema Direktivi EU 1999/31/EC [8] od 2003., odlaganje cijelih automobilske gume u okoliš nije dopušteno, a od 2006. nije dopušteno ni odlagati izrezane automobilske gume. Dok se 1992. u 12 država EU-a 65 % rabljenih guma odlagalo na deponije, a samo 35 % zbrinjavalo na neki drugi način, godine 2002. situacija je bila potpuno suprotna. U tadašnjih 15 država EU-a 65 % rabljenih guma zbrinjavalo se protektiranjem (obnovom guma), reciklažom, upotrebom u energetske svrhe ili izvozom za ponovnu upotrebu, a manje od 35 % završavalo je na deponijama [9]. Podaci pokazuju to da je u periodu od 1994. do 2011. količina reciklirane gume u nekoliko zemalja diljem svijeta narasla s 20 % na 95 % [10].

Početak 20. stoljeća provedeni su pokusi u svrhu poboljšanja kvalitete asfaltnih mješavina dodavanjem gumenoga granulata prirodnome agregatu. Rezultati brojnih ispitivanja kao i praktična iskustva opravdali su dodavanje gumenoga granulata u bitumensku mješavinu, jer se na taj način smanjuje osjetljivost asfaltnih kolnika na nastanak pukotina te produžava uporabni vijek. Suvremena upotreba reciklirane otpadne gume u asfaltu primijenjena je 1960. kada je inženjer Charles McDonald, zabrinut zbog visokih troškova održavanja cesta i skupoga popravljivanja pukotina u asfaltu, razvio "mokri postupak – dodavanje granulata otpadne gume u bitumen" pri izvedbi površinske obrade u sklopu održavanja asfaltnih kolnika [11].

Reciklirana automobilska guma u bitumenskoj mješavini može biti dodatak bitumenu ("mokri" postupak) ili se pojavljivati kao sastavni dio agregata ("suhi" postupak). Asfalt s gumom uveden je u proizvodnju raznih tipova bitumenskih mješavina, a proizvodi se "suhim" ili "mokrim" postupkom. Kod "mokrog" postupka mrvica i vezivo miješaju se kako bi se formirala homogena mješavina bitumena i gume koja se zatim miješa s agregatima [13]. U "suhome" postupku mrvica se miješaju izravno s agregatima kako bi se proizvela asfaltna mješavina s gumom. U usporedbi s "mokrim" postupkom, vrijeme reakcije

u "suhome" postupku znatno je kraće i sporije zbog većih veličina čestica [14]. Istraživanjem učinaka gume na svojstvo asfalta bavili su se brojni istraživači [12–19, 20–26]. Tai Nguyen i Nhan Tran [15] potvrdili su to da se asfalt s gumom proizveden "suhim" postupkom može koristiti u fleksibilnome kolniku za ublažavanje kolotraga. Autori Shen i dr. [16] u svojem su se radu bavili interakcijom usitnjene gume i veziva "suhim" postupkom. Desetogodišnje istraživanje floridskoga ministarstva prometa [17] pokazuje to kako "mokri" postupak daje bolje rezultate nego "suhi" postupak.

Termalni postupak starenja veziva modificiranoga s udjelom gume i elastomernoga dodatka bitumenu opisali su u svojem radu autori Xiang i dr. [18]. Laboratorijska i terenska ispitivanja prema autorima Xiao i drugi [19] pokazuju to da se dodavanjem gume u asfalt poboljšavaju trajnost i otpornost na kolotražnje. Utjecaji na vrijednosti otpornosti na kolotražnje i modul krutosti asfalta s polimerom modificiranim bitumenom (PmB) izvedenom na hidroizolaciji kolničke ploče objekata opisani su u radu [20]. Kao nastavak istraživanja autori su predložili provjeru utjecaja na svojstva asfalta koji u vezivu ima dodatak gume. Istraživanja Paje i drugih [21] pokazuju da se korištenjem asfalta s dodatkom gume razina buke smanjuje za 3 dB, čime se olakšava život u sredinama u kojima ljudi rade i borave. Eksperimentalni rezultati provedeni u istraživanju autora Franesqui i dr. [22] dokazali su to da asfalt s gumom znatno poboljšava otpornost na vlagu, otpornost na pojavu kolotraga, otpornost i stabilnost na oštećenje vode te udovoljava standardnim specifikacijama za kolnike i nudi dovoljan dinamički modul krutosti u usporedbi s istim asfaltom bez gume. Više od četiri desetljeća iskustva kalifornijskoga ministarstva prometa pokazuje da proizvodi od asfalta s dodatkom gume mogu biti izdržljivi i produljiti životni vijek asfalta, ako su ispravno proizvedeni i ugrađeni [23]. Cilj je upotrebe gume u asfaltu postići bolja projektirana fizikalno-mehanička svojstva asfaltnoga sloja i bolja svojstva vozne površine kolnika u eksploataciji. Dodavanje gume u bitumen pokazalo je povećanje vrijednosti penetracije prije kratkoročnog starenja i UV zračenja i nakon njih. Niža viskoznost modificiranoga bitumena gumom potvrdila je bolju obradivost i konstruktivnost veziva, kako navode autori Rasool i dr. [24]. Autori [25] su zaključili to kako rezultati provedenih ispitivanja pokazuju da stupanj razgradnje usitnjene gume utječe na njegovu disperziju i interakciju s modificiranim elastomernim dodatkom bitumenu, što pozitivno utječe na proizvodnju modificiranih bitumena. Autori Sri Wulandary i Tajandra [26] utvrdili su kako dodatak gume povećava kvalitetu asfaltnih mješavina te omogućuje i niži udio bitumena u asfaltnoj mješavini s dodatkom modificirane gume.

2. Primjena reciklirane gume u asfaltu

Sve češća upotreba polimerom modificiranih bitumena (PmB) u asfaltnim kolnicima rezultirala je ispitivanjima čija je svrha utvrditi u kojoj se mjeri mogu poboljšati svojstva običnoga cestograđevnog bitumena i na taj način uštedjeti na cijeni skupoga asfalta s PmB-om u završnome sloju ceste. U 2006. provedena

Tablica 1. Podaci o prosječnoj godišnjoj i prosječnoj ljetnoj dnevnoj promet

Oznaka ceste	Brojačko mjesto	Godina brojanja prometa	Promet		Povećanje opsega prometa [%]		Brojački odsječak	Duljina [km]
			PGDP	PLDP	PGDP	PLDP		
Zagrebačka obilaznica	-	2008. [27]	54222	64210	0,18	9,13	čv. Jankomir – čv. Lučko	5,1
		2015. [27]	54317	70074				
A3	3302 Kutina – istok	2006. [28]	16220	23819	18,71	16,15	čv. Kutina – čv. Novska	21,1
		2016. [28]	19255	27665				
		2017. [29]	19969	28107	3,71	1,60		

Tablica 2. Vrste bitumena korištene na pokusnim dionicama

Vrste bitumena	Oznaka bitumena	Udio gume u asfaltnoj mješavini % [m/m]	Dionice	Pozicije	Stacionaže [km]
Cestograđevni bitumen B 50/70	B-R	1,0	I	1.	0+160
		1,0	III	5.	116+750
		1,1	II	4.	20+950
Polimerom modificirani bitumen PmB 50-90s	PmB-R	0,36	III	6.	117+400
		0,37	II	2.	15+920
	PmB	0,0	II	3.	15+820
			III	7.	117+600

su istraživanja mogućnosti upotrebe otpadne automobilske gume kao dodatka bitumenu u svrhu postizanja boljih svojstava bitumenskih mješavina te zamjene ili smanjivanja udjela polimera u bitumenskoj vezivu. Nakon što su laboratorijska istraživanja provedena, izvedene su tri pokusne dionice asfaltnoga kolnika SMA 8 i SMA 16 s dodatkom gume. Prva pokusna (I.) dionica izvedena je na gradskoj cesti u Zagrebu (Sveučilišna aleja), na površini od 6630 m², druga pokusna (II.) dionica na autocestovnoj obilaznici grada Zagreba, na površini od 11.550 m², a treća pokusna (III.) dionica na autocesti A3 Zagreb – Lipovac, na površini od 22.500 m². Na tim su pokusnim dionicama kao vezivo u asfaltu korišteni cestograđevni bitumen B 50/70 i bitumen modificiran polimerom PmB 50-90s, a kao dodatak bitumenskoj mješavini korišten je reciklirani granulat gume tipa Asaplex F-100.

Cilj izrade pokusnih dionica bio je utvrditi prednosti korištenja asfalta s gumom modificiranim bitumenom radi pronalaženja tehničkih i ekonomskih prednosti asfalta s dodatkom gume te ekološkoga zbrinjavanja otpadnih guma.

Za potrebe istraživanja prikupljene su vrijednosti kretanja prometnoga opterećenja u promatranome periodu eksploatacije. Za I. pokusnu dionicu podaci o prometnome opterećenju nisu uzimani u razmatranje jer je riječ o gradskoj prometnici s malim opsegom prometa. Na II. pokusnoj dionici između čvorišta Jankomir i Lučko dostupni su podaci o brojanju prometa između 2008. i 2015. Prema njima, prosječni godišnji dnevni promet (PGDP) porastao je 0,18 %, a prosječni ljetni dnevni promet (PLDP) 9,13 %, a što je vidljivo u tablici 1. Prema podacima o brojanju prometa na III. pokusnoj dionici, odnosno na autocesti A3 Zagreb – Lipovac (čvorište Kutina – čvorište Novska), u

razdoblju od 2006. do 2016. prosječni godišnji dnevni promet (PGDP) porastao je 18,71 %, a prosječni ljetni dnevni promet (PLDP) 16,15 %, a što je također vidljivo u tablici 1. U razdoblju od 2016. do 2017. PGDP porastao je 3,71 %, a PLDP 1,60 %.

3. Asfalt s gumom modificiranim bitumenom prije eksploatacije – 2006.

3.1. Materijali za izradu asfaltnih mješavina

Prilikom proizvodnje bitumenskih mješavina korištene su frakcije kamenoga materijala "Ljubeščica" 0/2, 2/4, 4/8 i 8/11 mm i kamenoga brašna "Očura" [30]. Kontrola kvalitete materijala i radova provedena je u skladu s Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama [31]. Za izradu asfaltnih mješavina tipa SMA korištenih na pokusnim dionicama asfalta s gumom modificiranim bitumenom upotrijebljeni su tipovi bitumena prikazani u tablici 2. Kao dodatak bitumenskoj mješavini korišten je reciklirani granulat gume tipa Asaplex F-100.

3.2. Sastav i svojstva laboratorijskih uzoraka načinjenih od proizvedenih bitumenskih mješavina

Utvrđeni sastav bitumenskih mješavina tijekom ugradnje na pokusnim dionicama s udjelom bitumena od 5,6 % do 6,6 % (m/m) prikazan je u tablici 3. Topivi udio bitumena ispitan je prema normi HRN EN 12697-1 [32]. Vrijednosti iskazane u tablici 3. prikazuju srednje vrijednosti sastavnih komponenti

Tablica 3. Sastav proizvedene asfaltne mješavine i udio šupljina u Marshallovim uzorcima

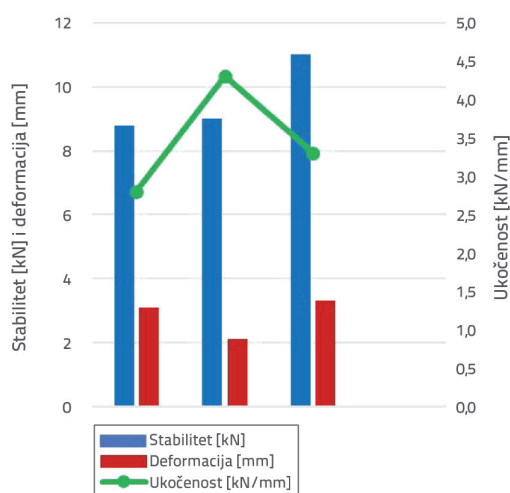
Dionica – tip asfalta, vrsta bitumena i udio gume	Udio bitumena % [m/m]	Sito [mm]									Koncentracija šupljina laboratorijskoga uzorka % (v/v)
		0,09	0,25	0,71	2	4	8	11,2	16	22,4	
		% [m/m]									
I – SMA 8 [36] B 50/70 1,0 % gume	6,6	9,8	12,8	15,6	22,8	31,4	90,7	100	-	-	3,4
III.1. – SMA 16 [37] B 50/70 1,1 % gume	5,8	9,5	10,6	12,7	18,4	25,0	30,4	48,1	99,8	100	2,8
III.2. – SMA 16 [37] B 50/70 1,0 % gume	5,6	8,0	9,2	11,0	15,5	20,9	27,6	47,6	96,3	100	2,5

Tablica 4. Prikaz koncentracija šupljina i stupnja zbijenosti u sloju te otpornosti na kolotražnje

Broj dionice i tip asfalta	Koncentracija šupljina u sloju / uvjet kvalitete [%]	Stupanj zbijenosti / uvjet kvalitete [%]	Debljina sloja / projektirana debljina [mm]	Udio WTS bitumena / PRD % [m/m]	Gustoća sloja [Mg/m ³]
I – SMA 8	7,4 / 2,5-8	99,2 / ≥ 98	41,9 / 30	6,6 / 5,6	2,353
III.1. – SMA 16	4,0 % / 2,5-8	-	-	5,8 / 4,9	2,463
III.2. – SMA 16	5,5 % / 2,5-8	-	-	5,6 / 3,3	2,436

ispitanih uzoraka (granulometrija dodatka pulverizirane gume je u rasponu 0 – 0,5 mm) i udio šupljina na Marshallovim uzorcima pripremljenima prema HRN EN 12697-30 [33].

Na proizvedenoj bitumenskoj mješavini određena je gustoća [34], a na Marshallovim uzorcima načinjenima u laboratoriju utvrđena je gustoća asfalta prema normi HRN EN 12697-6 [35] te je izračunan udio šupljina prema HRN EN 12697-8 [36]. Na Marshallovim asfaltnim uzorcima ispitani su stabilitet i deformacije te je na temelju odnosa stabiliteta (kN) i deformacije (mm) izračunana ukočenost (kN/mm), a što je prikazano na slici 1.



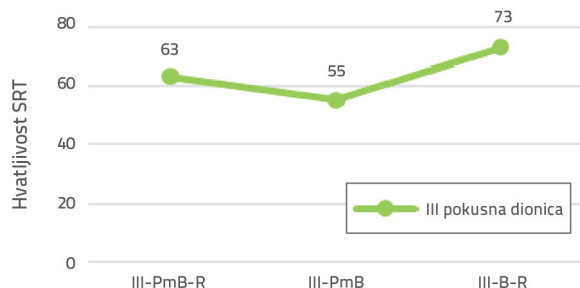
Slika 1. Odnos stabiliteta (kN), deformacije (mm) i ukočenosti (kN/mm)

3.3. Svojstva izvedenoga asfaltnog sloja prije eksploatacije

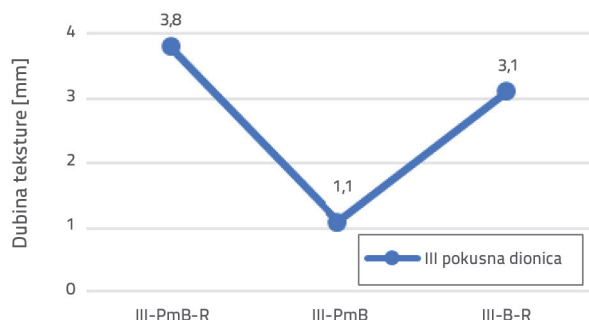
Nakon što je ispitani izvedeni asfaltni sloj na uzorcima uzetim za pokusnih dionica kolnika, utvrđeni su gustoća sloja prema HRN EN 12697-5 [34] i debljina sloja prema HRN EN 12697-36 [39] te su izračunani koncentracija šupljina u sloju prema HRN EN 12697-8 [36] i stupanj zbijenosti. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.

Kolotrazi se ispituju na asfaltnome uzorku kao uzdužno ulegnuće u putanji kotača s malim uzdignućima na rubovima, a nastaju zbog progresivnih deformacija pri opetovanim opterećenjima ispitnoga kotača. Najveća brzina kolotražnja WTS_{AIR} i najveća relativna dubina kolotruga PRD_{AIR} ispitani su prema normi HRN EN 12697-22 [40]. Na prvoj pokusnoj dionici najveća brzina kolotražnja WTS_{AIR} iznosi 0,02 (mm/1000 ciklusa), a najveća relativna dubina kolotruga PRD_{AIR} 5,6 %. Na trećoj pokusnoj dionici brzine kolotražnja kreću se od najveće 0,042 (mm/1000 ciklusa) na 5. poziciji do najmanje 0,023 (mm/1000 ciklusa) na 6. poziciji. Relativne dubine kolotruga kreću se od 3,3 % do 4,9 %. Može se primijetiti to da je ista relativna dubina kolotruga dobivena i na poziciji asfalta s gumom i na poziciji asfalta bez gume.

Na voznoj površini ispitana je hvatljivost prema HRN EN 13036-4 [41], čije su vrijednosti prikazane na slici 2. (III. dionica). Na slici 3. prikazani su rezultati mjerenja dubine teksture vozne površine prema HRN EN 13036-1 [42].



Slika 2. Prikaz rezultata hvatljivosti vozne površine



Slika 3. Prikaz rezultata teksture vozne površine

Uzdužna ravnost vozne površine pokazuje stanje služnosti kolnika. Kako bi se dobila objektivna slika stanja ravnosti kolnika i udobnosti vožnje, potrebno je provesti mjerenja primjenom najsuvremenijih mjernih uređaja. Uzdužna ravnost ispitana je hodajućim elektroničkim profilerom *Walking Profilerom* prema AGPT/T450 [43] i normi HRN EN 13036-5 [44] te su na jednome voznom traku utvrđene vrijednosti 1,59, a na drugome voznom traku 1,72. Ukupna srednja vrijednost uzdužne ravnosti iznosila je 1,66 IRI m/km.

4. Asfalt s gumom modificiranim bitumenom nakon eksploatacije u razdoblju 2006. – 2017. godine

4.1. Uzorkovanje i mjerenja asfalta na pokusnim dionicama

Nakon 11 godina pod prometnim opterećenjem prikazanim u tablici 1. na asfaltnome kolniku s gumom i polimerom modificiranim bitumenom provedena su istraživanja u svrhu utvrđivanja svojstava sloja i vozne površine kolnika na sedam pozicija, na tri pokusne dionice (tablica 2.), i to:

- na prvoj (I.) pokusnoj dionici asfalta SMA 8 [45] s dodatkom gume, u jednoj poziciji;
- na drugoj (II.) pokusnoj dionici asfalta HS 16D (SMA), u tri pozicije, na jednoj poziciji ugrađen asfalt bez dodatka gume (PmB);
- na trećoj (III.) pokusnoj dionici asfalta HS 16D (SMA-EN) [45], u tri pozicije, na jednoj poziciji ugrađen asfalt bez dodatka gume (PmB).

Uzorkovanje asfaltnih uzoraka iz kolnika na zadanim pozicijama i mjerenja proveo je *Ramtech d.o.o.*, u čijem su laboratoriju provedena sva ispitivanja.

Na zahtjev Graditeljskog odjela Tehničkog veleučilišta u Zagrebu, prije postupka uzorkovanja asfalta iz kolnika, a kako bi se mogla uspostaviti privremena regulacija prometa, na I. pokusnoj dionici ishođena je suglasnost zagrebačkoga gradskog ureda, a na II. i III. pokusnoj dionici suglasnost *Hrvatskih autocesta*. Privremena regulacija prometa na I. pokusnoj dionici bila je organizirana uz pomoć vozila sa svjetlećom strelicom koja je upozoravala vozače na to koji je trak privremeno zatvoren za promet. Na II. i III. pokusnoj dionici privremena regulacija prometa bila je organizirana uz pomoć čunjeva i strelica pa je promet tekao preticajnim trakom. Iako je vrijeme uzorkovanja bilo koordinirano s nadležnim prometnim službama, na II. pokusnoj dionici (između 10 i 12 sati, izvan dnevnih, tjednih i sezonskih vršnih prometnih tokova) formirala se kolona vozila dulja od četiri kilometra. Privremena regulacija prometa morala je biti uspostavljena kako bi se asfalt mogao uzorkovati neometano i bez opasnosti za stručno osoblje koje je provodilo uzorkovanje te mjerenje vozne površine. Dodatna svjetleća strelica bila je postavljena na izlazu iz pratećega uslužnog objekta (PUO Lipovljani) na III. pokusnoj dionici kako bi vozila koja izlaze s parkirališta bila upozorena na uzorkovanja u voznome traku.

4.2. Prva pokusna dionica – Sveučilišna aleja u gradu Zagrebu

Uzorci na I. pokusnoj dionici uzeti su u ljeto 2017., i to u smjeru sjever – jug, s desnog traka u stacionaži 0+160. Vrijeme je na dan uzorkovanja bilo sunčano i vruće, s temperaturom zraka od 33 °C i bez vjetrova. U postupku uzorkovanja izvađeni su uzorci asfaltnih slojeva kolnika veličine 3 x ø200 mm i 8 x ø100 mm (slika 4). S te dionice ispitan je asfaltni sloj tipa splitmastiksasfalt SMA 8 s cestograđevnim bitumenom B 50/70 kao vezivom i s udjelom otpadne gume od 1,0 %. Kao dodatak upotrijebljena je reciklirana guma tipa Asaplex F100 (nisko temperaturna guma koja se uglavnom temelji na prirodnoj gumi).



Slika 4. Prikaz svih jedanaest izvađenih uzoraka

Na voznoj površini asfaltnoga kolnika ispitana je otpornost površine kolnika na klizanje uz pomoć uređaja s klatnom (*Skid Resistance Tester*) prema HRN EN 13036-4 [41]. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 13. Na terenu je određena i dubina teksture vozne površine kolnika metodom pjeskarenja prema HRN EN 13036-1 [42]. Nakon uzorkovanja pristupilo se vizualnome pregledu dionice te su uočene mikro (vlasaste) pukotine. Kod parkiranih vozila uočeni su trošenje vozne površine (slika 5.), mrežaste pukotine u blizini revizijskih okana te uzdužne i poprečne pukotine na sredini voznoga traka.



Slika 5. Prikaz trošenja vozne površine

4.3. Druga pokusna dionica – obilaznica grada Zagreba

Na voznome traku sjevernoga kolnika autocestovne obilaznice u smjeru Zagreb – Bregana (granica sa Slovenijom) uzorkovanje je provedeno u jesen 2017. godine. Vrijeme na dan uzorkovanja bilo je hladno, s temperaturom zraka oko 10°C. Ispitne su tri pozicije u stacionažama km 15+920 (2. pozicija), km 15+820 (3. pozicija) i km 20+950 (4. pozicija). Sve su bile na sredini voznoga traka. Vizualnim pregledom na II. pokusnoj dionici uočena je pukotina s udubljenjem (strukturni problem kolničke konstrukcije).

4.4. Treća pokusna dionica – autocesta A3 Zagreb – Lipovac (Lipovljani – Dragalić)

Uzorci na III. pokusnoj dionici uzeti su u jesen 2017. Vrijeme je bilo poluoblačno, s umjerenom temperaturom zraka. Ispitane su tri pozicije asfaltnoga kolnika u stacionažama km 116+750 (5. pozicija), km 117+400 (6. pozicija) i km 117+600 (7. pozicija). Sve su pozicije bile u voznome traku. Na toj su dionici vizualnim pregledom uočene pukotine na radnome spoju asfalta s gumom i asfalta bez gume. Nijedna od navedenih pukotina nije zapunjena, a što omogućuje prodor vode u kolničku konstrukciju i njezinu degradaciju.

5. Svojstva ispitanih bitumena s pokusnih asfaltnih dionica nakon 11 godina eksploatacije

Pozicije pojedinih pokusnih dionica sadrže razne vrste veziva korištene tijekom izvođenja kolnika 2006. U nekima se upotrebljavala guma kao dodatak asfaltu. Izdvojena su i ispitana veziva sa svih pozicija svih asfaltnih slojeva. Zbog prisutnosti gume u asfaltu izdvojena veziva čine tri skupine:

- B-R, cestograđevni bitumen B50/70 s dodatkom 1 % gume Asaplex F-100;
- PmB-R, polimerom modificirani bitumen PmB 50-90s s dodatkom 0,3 % gume Asaplex F-100;
- PmB, polimerom modificirani bitumen Pmb 50-90s bez dodatka.

U tablici 5. prikazani su rezultati ispitivanja svojstava točke razmekšanja, penetracije i elastičnoga povrata bitumena ekstrahiranih iz slojeva asfalta na pozicijama pokusnih dionica prema udjelima gume.

Ako se nakon 11 godina usporede izdvojena veziva PmB-R iz asfalta s dodatkom gume i PmB bez dodatka gume, vidljivo je to da su svojstva približno jednaka, osim penetracije koja je

Tablica 5. Prikaz vrijednosti točke razmekšanja, penetracije i elastičnoga povrata bitumena

Broj pokusne dionice i oznaka bitumena	Udio gume u asfaltnoj mješavini [%]	Svojstva veziva ekstrahiranih iz slojeva asfalta u pozicijama		
		Točka razmekšanja PK [°C]	Penetracija (1/10 mm)	Elastični povrat [%]
I-B-R	1,0	65,4	37	50
II-PmB-R	0,3	69,2	52	89
II-PmB	0,0	70,8	36,6	85
II-B-R	1,0	57,5	38	46
III-PmB-R	0,3	71,4	40	80
III-PmB	0,0	66,1	39,1	80
III-B-R	1,0	52,2	53,2	36

Tablica 6. Granulometrijski sastav bitumenskih mješavina izvađenih iz asfaltnoga kolnika

Dionica i oznaka bitumena	Udio bitumena [%]	Granulometrijski sastav [%] prema EN 933-1 [46] na slogu sita otvora prema EN 933-2 [47] [mm]								
		0,063	0,25	1	2	4	8	11,2	16	22,4
I-B-R	7,6	11,0	12	17	24	36	95	100	100	100
II-PmB-R	5,8	8,4	12	19	24	33	49	70	100	100
II-PmB	6,3	7,8	12	19	25	35	57	74	99	100
II-B-R	6,2	8,4	10	17	22	32	48	70	96	100
III-PmB-R	5,7	9,1	11	17	22	27	33	60	100	100
III-PmB	5,4	10,6	15	20	24	30	39	63	98	100
III-B-R	6,2	10	11	17	24	29	36	59	100	100

kod PmB-R povećana. Na temelju toga može se zaključiti da 0,3 % gume u asfaltu nakon 11 godina smanjuje otvrdnjavanje polimernoga bitumena, iako vezivo ostaje jednako degradirano i s jednakim elastičnim svojstvima kao PmB bez gume nakon 11 godina.

Rezultati ispitivanja cestograđevnoga bitumena izdvojenog nakon 11 godina iz asfalta s dodatkom gume upućuju na činjenicu da 1 % gume u asfaltu polimerizira i bitumensko vezivo. Osobito je to vidljivo iz svojstva elastičnoga povrata, koji se javlja u vezivu sa sve tri dionice. Ipak, utjecaj gume najviše je vidljiv na I. pokusnoj dionici jer tamo točka razmekšanja i elastični povrat imaju najveće vrijednosti. Prema svojstvima, bitumen B-R može se svrstati u tip tvrdoga polimernog bitumena PmB 25/55-55, u skladu sa specifikacijom za polimerne bitumene HRN EN 14023. Na temelju usporedbe rezultata svojstava bitumena ekstrahirana iz asfaltnoga sloja u eksploataciji, i to cestograđevnoga bitumena B 50/70 s udjelom gume (B-R) i polimerom modificiranog bitumena PmB 50-90s s (PmB-R) i bez udjela gume (PmB), može se zaključiti sljedeće:

- Nakon 11 godina cestograđevni je bitumen B 50/70 dodavanjem 1 % gume u asfalt postao izdvojeno vezivo koje se svrstava u tvrdi tip polimernoga bitumena B 25/55-55.
- Nakon 11 godina eksploatacije kolnika polimerni bitumen PmB očekivano je tijekom dugoročnoga starenja postao degradiran i oksidiran, no unatoč tomu zadržao je bitna elastična svojstva veziva.
- Polimerni bitumen PmB-R izdvojen iz asfalta s dodatkom 0,3 % gume smanjene je tvrdoće u odnosu na PmB bez dodatka gume, a ostala su svojstva ostala približno jednaka i bez većih razlika.

6. Rezultati ispitivanja i mjerenja na pokusnim dionicama asfalta nakon 11 godina eksploatacije

Analiza rezultata o svojstvima asfalta habajućega sloja provedena je nakon 11 godina eksploatacije (2006. – 2017.) usporedbom mješavina istoga sastava s raznim tipovima bitumenskoga veziva s dodatkom gume (B-R i PmB-R) i bez dodatka gume (PmB). Promatrana je promjena koju dodatak

gume bitumenskome vezivu izaziva u svojstvu asfalta. Usporedbe su napravljene unutar asfalta jedne dionice (isti sastav, različito vezivo) te između asfalta II. i III. pokusne dionice (različit sastav, isto vezivo).

6.1. Sastav bitumenskih mješavina

6.1.1. Granulometrijski sastav bitumenske mješavine

Granulometrijski sastav karakterističan je za tri različita tipa splitmastiks (SMA) asfalta. Radi se o mješavini SMA 8 nominalne veličine zrna 8 mm (I. dionica) i dviju nominalnih veličina zrna 16 mm (II. i III. pokusna dionica), ali različitog udjela najkrupnije frakcije. Bitumenska mješavina SMA 16 (granulometrija prema EN normi) II. pokusne dionice sadrži približno 30 % frakcije agregata 11/16 mm, dok mješavina SMA 16 III. dionice u svojem granulometrijskom sastavu ima oko 40 % iste frakcije (tablica 6.).

6.1.2. Volumetrijski sastav bitumenske mješavine

Iz kolnika uzorkovane su jezgre s pokusnih dionica habajućih asfaltnih slojeva te su u laboratoriju pripremljeni i ispitani uzorci čije su volumetrijske karakteristike određene prema HRN EN 12697-6 [35] prikazane u tablici 7.

6.1.3. Volumetrijski sastav asfaltnoga sloja

Na temelju rezultata ispitivanja laboratorijski pripremljenih i s trase uzorkovanih probnih tijela izračunan je stupanj zbijenosti asfaltnih slojeva te je zaključeno to kako su svi asfaltni slojevi prošli odgovarajući proces dokomprimacije te da su ugrađeni pri svojoj maksimalnoj zbijenosti (tablica 8.). Taj je podatak bitan za razumijevanje rezultata ispitivanja otpornosti na kolotraženje.

6.2. Stabilitet i ukočenost Marshallovih uzoraka bitumenskih mješavina

Stabilitet i ukočenost Marshallovih uzoraka promjera 101,6 mm pripremljenih Marshallovim nabijačem prema EN 12697-

Tablica 7. Volumetrijski sastav bitumenskih mješavina izvađenih iz kolnika

Dionica i oznaka bitumena	Udio bitumena % (m/m)	Gustoća mješavine [Mg/m ³]	Gustoća laboratorijskoga uzorka [Mg/m ³]	Koncentracija šupljina laboratorijskoga uzorka % (v/v)	Ispuna šupljina bitumenom u kamenome materijalu % (v/v)
I-B-R	7,6	2,477	2,393	3,4	84,0
II-PmB-R	5,8	2,575	2,491	3,3	81,2
II-PmB	6,3	2,617	2,543	2,8	84,6
II-B-R	6,2	2,570	2,471	3,9	79,3
III-PmB-R	5,7	2,568	2,504	2,5	84,9
III-PmB	5,4	2,632	2,531	3,8	77,8
III-B-R	6,2	2,552	2,481	2,8	84,6

Tablica 8. Elementi volumetrijskoga sastava asfaltnoga sloja

Dionica i oznaka bitumena	Debljina sloja [mm]	Gustoća sloja [Mg/m ³]	Koncentracija šupljina u sloju [%]	Stupanj zbijenosti sloja [%]
I-B-R	42	2,390	3.5	99.9
II-PmB-R	53	2,515	2.3	101.0
II-PmB	46	2,562	2.1	100.7
II-B-R	49	2,472	3.8	100.1
III-PmB-R	54	2,505	2.5	100.0
III-PmB	54	2,525	4.1	99.7
III-B-R	55	2,498	2.1	100.7

Tablica 9. Stabiliteti i ukočenosti laboratorijskih probnih tijela

Svojstvo	Jedinica	I-B-R	II-PmB-R	II-PmB	II-B-R	III-PmB-R	III-PmB	III-B-R
Stabilitet S	kN	11,6	10,8	9,4	10,2	10,8	11,4	11,3
Deformacija d	mm	4,6	6	3,9	5,5	5,2	6,6	5,2
Ukočenost S/d	kN/mm	2,5	1,8	2,4	1,8	2,1	1,7	2,2

34 [48] ispitani su pri temperaturi od 60 °C. Nije uočljiv jasan trend u vrijednostima stabiliteta i ukočenosti kod asfalta istoga sastava, a različitoga veziva, niti postoji pravilnost ako se promatraju asfalti istoga veziva, a različitoga sastava (tablica 9.). Razlike koje se pojavljuju među njima ne upućuju na određenu pravilnost koja ovisi o sastavu asfalta ili vrsti veziva. Za izračunane ukočenosti može se zaključiti isto, dok je kod bitumenskih mješavina prije eksploatacije (slika 1.) utvrđena veća ukočenost kod polimerom modificiranoga bitumena s dodatkom gume (III-PmB-R).

6.3. Osjetljivost na vodu

Osjetljivost na vodu jedan je od glavnih mehanizama oštećenja i propadanja asfalta. Karakterizira je gubitak adhezivne veze između bitumenskoga veziva i agregata te slabljenje kohezivnih veza unutar samoga bitumenskoga veziva zbog djelovanja prometnoga opterećenja i prisutnosti vlage. Otpornost asfalta na djelovanje vode ispitana je na uzorcima pripremljenima u

laboratoriju smanjenom energijom zbijanja. Smanjena energija zbijanja pretpostavlja slučaj loše ugrađenoga asfaltnog sloja, čije su koncentracije šupljina na gornjoj granici prihvatljivosti. Navedeni uvjeti pripreme prikladni su za procjenu uporabljivosti asfalta na rubu zahtjeva za ugrađeni sloj, dakle, minimalne zbijenosti i maksimalnih šupljina, na što i upućuje norma HRN EN 12697-12 [49].

Osjetljivost asfalta na djelovanje vode ispitana je metodom HRN EN 12697-12 [49] postupkom A. Cilindrični uzorci promjera 101,6 mm pripremljeni su od mješavine iz asfaltnoga sloja Marshallovim zbijanjem i energijom zbijanja 2 x 35 udaraca. Referentna skupina uzoraka (ITS_{dry}) držana je u suhim uvjetima na sobnoj temperaturi od 25 °C, dok je skupina zasićena vodom (ITS_{wet}) kondicionirana u vodenoj kupelji pri temperaturi od 40 °C. Nakon trodnevnoga kondicioniranja objema ispitnim skupinama određena je indirektna vlačna čvrstoća (HRN EN 12697-23) [50] na ispitnoj temperaturi od 15°C. Određen je odnos indirektna vlačne čvrstoće ispitne skupine kondicionirane u vodi prema ispitnoj skupini kondicioniranoj u zraku. Svaka

Tablica 10. Osjetljivost laboratorijskih uzoraka načinjenih od mješavine iz asfaltnog sloja na vodu

Svojstvo	Jedinice	I-B-R	II-PmB-R	II-PmB	II-B-R	III-PmB-R	III-PmB	III-B-R
ITS _{wet}	kPa	1420	1170	1370	1870	1040	1210	1710
ITS _{dry}	kPa	1590	1550	2180	2440	1220	1920	2040
ITSR	%	89,3	75,5	62,8	76,6	85,2	63,0	83,8

Tablica 11. Otpornost asfaltnih uzoraka na kolotraženje odnosno na pojavu trajne deformacije

Svojstvo	Jedinica	I-B-R	II-PmB-R	II-PmB	II-B-R	III-PmB-R	III-PmB	III-B-R
WTS _{AIR}	mm/1000 ciklusa	0,06	0,09	0,07	0,12	0,06	0,04	0,09
PRD _{AIR}	%	2,1	3,7	3,3	5,0	3,9	2,3	6,4

skupina sadržavala je po tri uzorka. Srednje vrijednosti referentnih vlačnih čvrstoća (ITS_{dry}) i zadržanih (ITS_{wet}) vlačnih čvrstoća nakon djelovanja vode kao i njihovi omjeri (ITSR) navedeni su u tablici 10.

Objekti mješavine, SMA 16 (granulometrija prema EN normi) na II. pokusnoj dionici i SMA 16 na III. pokusnoj dionici s obje vrste veziva s gumom, polimerom modificirani PmB-R i cestograđevni B-R bitumen pokazuju znatno veću sposobnost opiranja razornome djelovanju vode nego što je to uočeno kod polimernoga bitumena PmB bez gume. Osjetljivost na vodu ITSR asfalta s gumom PmB-R i B-R podjednaka je, sa zanemarivom razlikom. Asfalt s bitumenom PmB bez gume je 10 manje otpornosti na SMA 16 (granulometrija prema EN normi) i 21 manje otpornosti na SMA 16, nego što su asfalti s vezivom oplemenjenim gumom. Otpornosti na vodu ITSR svih asfalta s gumom veće su na III. pokusnoj dionici, dok su, suprotno tomu, gotovo isti u slučaju čistoga PmB-a bez gume.

Indirektno mjerene vlačne čvrstoće "suhih" ITS_{dry} i "mokrih" ITS_{wet} skupina uzoraka unutar svake dionice najmanje su na vezivu PmB-R, a najveće na B-R. Vlačne čvrstoće "suhih" i "mokrih" skupina s II. pokusne dionice veće su u odnosu na vlačne čvrstoće "suhih" i "mokrih" skupina s III. pokusne dionice. Zaključeno je to kako SMA 16 (granulometrija prema EN normi) sitnije granulometrije bolje podnosi nanos opterećenja, ali ima slabiju otpornost na djelovanje vode. To je moguća posljedica raznih vrsta agregata u sastavu asfaltnih mješavina dviju dionica jer agregat ima znatan utjecaj na sposobnost adhezivnosti bitumenskoga filma.

6.4. Otpornost na kolotraženje

Ispitivanje otpornosti na pojavu kolotruga ispitano je na originalnim uzorcima promjera 200 mm, izbušenima iz kolnika. Priprema uzoraka i ispitivanje provedeno je prema B postupku norme EN 12697-22 [40], na malome uređaju u zraku. Prije i tijekom ispitivanja uređaj i ispitni uzorci kondicionirani su pri temperaturi od 60 °C, a opterećenje je zadano s 10.000 ciklusa, odnosno 20.000 prijelaza standardno opterećenoga gumenog kotača. Dva parametra koja opisuju otpornost na trajnu deformaciju asfaltnoga sloja jesu brzina kolotraženja *WTS_{AIR}*

izražena u milimetrima nastale deformacije na svakih 1000 ciklusa i najveća relativna deformacija *PRD_{AIR}*, postotni odnos najveće dubine kolotruga u odnosu na debljinu sloja u ispitivanju. Najbolju otpornost na trajnu deformaciju odnosno na najmanju brzinu kolotraženja kao i na relativnu deformaciju postižu asfalti s PmB vezivom (tablica 11.). Nešto je lošiji rezultat na asfaltima s vezivom PmB-R koji pokazuju veću brzinu i veću relativnu deformaciju od asfalta s PmB vezivom bez gume. Najslabiju otpornost na kolotraženje imaju asfalti s vezivom B-R, koji su pretrpjeli najveću relativnu deformaciju i brzinu kolotraženja. Sve to vrijedi za oba asfalta, SMA 16 (EN) II. pokusne dionice i SMA 16 III. pokusne dionice.

Usporedbom II. i III. pokusne dionice došlo se do rezultata prema kojima su brzine kolotraženja u pravilu manje na III. pokusnoj dionici, što je pozitivno i ne iznenađuje s obzirom na krupniji granulometrijski sastav toga asfalta.

Usporede li se najveće deformacije dviju pokusnih dionica, odnosno SMA 16 (granulometrija prema EN normi) sitnije i SMA 16 krupnije granulometrije, vidljivo je to kako asfalti s gumom II-PmB-R i II-B-R imaju manje relativne deformacije nego asfalti s gumom III-PmB-R i III-B-R. Obratno vrijedi za II-PmB, koji ima veću deformaciju od III-PmB.

S obzirom na to da su zbijenosti svih ispitanih asfaltnih slojeva jednake maksimalnoj, nameće se zaključak da je dominantan utjecaj na otpornost na kolotraženje imalo vezivo odnosno bitumenski mort čiji je dio i na čiju konzistenciju utječe pri povišenim temperaturama. Budući da su penetracija, elastični povrat i točka razmekšanja veziva II-PmB-R i III-PmB-R ekstrahiranih iz kolotraženih asfalta u prosjeku veći nego kod kombinacije veziva bez gume II-PmB i III-PmB, to bi moglo objasniti lošiju otpornost na kolotraženje asfalta s gumom nego na kolotraženje asfalta bez gume. Radi se o vjerojatnoj posljedici izraženijega starenja veziva u asfaltu bez dodatka gume.

6.5. Krutost

Krutost asfaltnoga sloja ispitana je prema EN 12697-26 [51], dodatku C (IT-CY), indirektnim vlačnim postupkom na cilindričnim uzorcima promjera 100 mm, izbušenima iz promatrane kolničke konstrukcije. Riječ je o odnosu opterećenja

Tablica 12. Krutosti asfaltnih uzoraka iz sloja

Svojstvo	Jedinica	II-PmB-R	II-PmB	II-B-R	III-PmB-R	III-PmB	III-B-R
Krutost, S 20 °C	MPa	1479,7	2106,0	4726,3	1894,3	3748,7	3670,0

Tablica 13. Hvatljivost asfaltnih slojeva

Svojstvo	Jedinica	I-B-R	II-PmB-R	II-PmB	II-B-R	III-PmB-R	III-PmB	III-B-R
Hvatljivost	SRT	-	58	53	52	56	56	55

i izazvane deformacije, a služi kao mjera strukturne stabilnosti asfaltnoga sloja u kolničkoj konstrukciji. Ispitivanje je provedeno pri temperaturi od 20 °C i frekvenciji propisanoj normom.

Prema rezultatima kolotražnja, očekivano su krutosti asfalta s vezivom PmB-R manje od krutosti asfalta s čistim polimernim bitumenom PmB, kao što je to prikazano u tablici 12. Ipak, suprotno očekivanome, krutost asfalta s vezivom B-R najveća je bez obzira na to što je taj asfalt na ispitivanju otpornosti na kolotražnje pretrpio najveću trajnu deformaciju. Uzrok je moguće potražiti u različitim ispitnim temperaturama dviju metoda, zbog čega se krutost može svrstati u svojstvo koje asfalt iskazuje pri srednjim temperaturama upotrebe, a otpornost na trajnu deformaciju pri višim temperaturama upotrebe. Potvrđeno je to kako krutosti i indirektna vlačna čvrstoća slijede isti trend porasta mjerenih vrijednosti od najmanjih za kombinacije veziva PmB-R do najveće za kombinaciju cestograđevnoga bitumena i gume B-R.

Treća pokusna dionica ima najmanju krutost na asfaltu PmB-R, dok su vrijednosti krutosti asfalta PmB i B-R gotovo izjednačene. Iz usporedbe dviju skupina rezultata, odnosno II. i III. pokusne dionice, vidljiva je nedosljednost u različitim trendovima porasta vrijednosti krutosti od PmB-R do B-R. Pretpostavlja se da je uzrok tome rasipanje mjerenih rezultata.

6.6. Hvatljivost vozne površine asfaltnoga kolnika

Hvatljivost je ispitana klatnom (engl. *pendulum tester*) prema EN 13036-4 [41]. Rezultati hvatljivosti potvrđuju očekivano, odnosno to da dodatak gume bitumenskome vezivu povećava otpornost na klizanje po voznoj površini asfalta (tablica 13.). Također je vidljivo to kako zrnatije teksture SMA 16 III. pokusne dionice u prosjeku imaju bolju hvatljivost.

Treba napomenuti to kako su dosada poznate vrijednosti hvatljivosti uglavnom mjerene neposredno nakon ugradnje, odnosno u vrijeme kada asfaltni sloj još nije trpio promet, pa je zanimljivo promatrati kako se te vrijednosti kreću nakon dužega razdoblja eksploatacije asfaltnoga sloja. Naravno, većina je

bitumenskoga morta habanjem nestala s vozne površine te su prometu ostala izložena gola zrna agregata, što je sigurno utjecalo na rezultate.

7. Zaključak

Istraživanje habajućega sloja asfalta provedeno je nakon 11 godina eksploatacije (2006. – 2017.) usporedbom bitumenskih mješavina istoga sastava s različitim tipovima bitumenskoga veziva s dodatkom otpadne reciklirane automobilske gume i bez njega. Prema dobivenim rezultatima ispitivanja i mjerenja na pokusnim dionicama moguće je zaključiti sljedeće:

- Ne postoji jasna dosljednost u slaganju rezultata stabilnosti i ukočenosti asfalta s obzirom na sličnost sastava bitumenskih mješavina ili istu kombinaciju bitumenskih veziva, ali radi se o ispitivanjima koja se uglavnom zamjenjuju dinamičkim ispitivanjima svojstava asfalta (kolotražnje i krutost).
- Dodatak gume u bitumenskome vezivu pospješuje vrlo važno svojstvo – otpornost asfalta na razorno djelovanje vode.
- Vlačne čvrstoće asfalta s polimernim bitumenom i gumom manje su nego vlačne čvrstoće asfalta s polimernim bitumenom bez gume, dok su najveće vrijednosti vlačnih čvrstoća zabilježene kod cestograđevnoga bitumena s dodatkom gume.
- Dodatak granulata gume u bitumenskome vezivu smanjuje otpornost na kolotražnje asfalta koji je prošao višegodišnji eksploatacijski period, što je posljedica veće oksidacije i bržega starenja bitumena bez dodatka gume.
- Krutost asfalta s cestograđevnim bitumenom i gumom veća je nego krutost asfalta s polimernim bitumenom i gumom, što potvrđuje učinak dodatka gume i polimera u bitumenskome vezivu na smanjivanje pojave pukotina u asfaltu (asfalt s polimernim bitumenom bez gume ima veću krutost od asfalta s polimernim bitumenom i gumom).
- Dodatak reciklirane gume u bitumenskome vezivu podiže otpornost na klizanje po voznoj površini asfaltnoga kolnika.

LITERATURA

[1] Zagvozda, M., Dimter, S., Dolaček-Alduk, Z.: Alternativni materijali – novi trend i izazov u graditeljstvu, Sabor hrvatskih graditelja 2012, Graditeljstvo – poluga razvoja (ur. Lakušić, S.), pp. 145-154, Cavtat 15.-17. studeni 2012.

[2] Aleksić, K.: Problemi i perspektive zbrinjavanja otpada u Republici Hrvatskoj, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Ekonomski fakultet, Split, travanj 2017.

- [3] Lo Presti, D.: Recycled Tyre Rubber Modified Bitumen for road asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 49 (2013), pp. 863-881
- [4] Pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama, NN 113/16, Hrvatski sabor, siječanj 2017.
- [5] Hungarian Tyre Association, <http://www.hta.org.hu/eng/tire.html>, 25.7.2018.
- [6] Kisgyörgy, L., Tóth, C., Geiger, A.: Modul elastičnosti asfalta s bitumenom modificiranim gumenim granulatom kao vezivom, *Građevinar*, 68 (2016) 7, pp. 533-541, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1451.2015>
- [7] Serdar, M., Baričević, A., Lakušić, S., Bjegović, D.: Betonski proizvodi specijalne namjene od reciklata otpadnih guma, *Građevinar*, 65 (2013), 9, pp. 793-801
- [8] Council of the European Union, "Council Directive 1999/31 EC of 26 April 1999 on the land fill of waste", 1999.
- [9] Vrekić, S.: Prilog recikliranju materijala u auto industriji i ugrožavanje životne sredine,
- [10] <http://www.cqm.rs/2012/cd1/pdf/39/36.pdf>, 2.8.2018.
- [11] Palković, B.: Guma u asfaltu, Dani prometnica 2010, Nove tehnologije i materijali (ur. Lakušić, S.), Građevinski fakultet, Zagreb, veljača 2010., pp. 295-313
- [12] Zhang, F., Hu, C.: The research for structural characteristics and modification mechanism of crumb rubber compound modified asphalts, *Construction and Building Materials*, 76 (2015), pp. 330-342
- [13] Shen, J., Xie, Z.: Comprehensive evaluation of the long-term performance of rubberized pavement: Phase I: Laboratory study of rubberized asphalt mix performance (No. FHWA-GA-12-1119), 2012.
- [14] Rahman, M.M., Airey, G D., Collop, A.C.: The mechanical properties of the dry process CRM asphalt mixtures following short-term and long-term ageing, *Seventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Trondheim, Norway, 2005.
- [15] Tai Nguyen, H.T., Nhan Tran, T.: Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of asphalt concrete and stone mastic asphalt using dry process, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11 (2018), pp. 236-244
- [16] Shen, J., Li, B., Zhaoxing, X.: Interaction between crumb rubber modifier (CRM) and asphalt binder in dry process, *Construction and Building Materials*, 149 (2017), pp. 202-206
- [17] Choubane, B., Sholar, G., Musselman, J., Page, G.: Ten-year performance evaluation of asphalt-rubber surface mixes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1681 (1999), pp. 10-18.
- [18] Xiang, L., Cheng, J., Kang, S.: Thermal oxidative aging mechanism of crumb rubber/SBS composite modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 75 (2015), pp. 169-175
- [19] Xiao, F., Amirkhanian, S., Juang, C.H.: Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (2007) 6, pp. 475-483.
- [20] Šimun, M., Rukavina, T., Dimter, S.: Otpornost na kolotraženje sustava hidroizolacija – asfaltni kolnik na mostovima, *Građevinar*, 65 (2013) 10, pp. 879-886
- [21] Paje, S.E., Luong, J.L., Vázquez, V.F., Bueno, M., Miró, R.: Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber – Influence on noise reduction, *Construction and Building Materials*, 47 (2013), pp. 789-798
- [22] Franesqui, M., Yepes, J., García-González, C.: Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 201 (2019), pp. 328-339
- [23] Zhou, H., Holikatti, S., Vacura, P.: Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1 (2014) 1, pp. 39-48.
- [24] Rasool, R., Wang, S., Zhang, Y., Li, Y., Zhang, G.: Improving the aging resistance of SBS modified asphalt with the addition of highly reclaimed rubber, *Construction and Building Materials*, 145 (2017), pp. 126-134
- [25] Rasool, R., Song, P., Wang, S.: Thermal analysis on the interactions among asphalt modified with SBS and different degraded tire rubber, *Constructions and Building Materials*, 182 (2018), pp. 134-143
- [26] Sri Wulandari, P., Tjandra, D.: Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete mixture, *Procedia Engineering*, 171 (2017), pp. 1384-1389
- [27] <http://hac.hr/hr/promet/brojanje-prometa>, 17.10.2018.
- [28] Brojanje prometa na cestama Republike Hrvatske godine 2016., Zagreb, 2017., Hrvatske ceste d.o.o.
- [29] https://hrvatske-ceste.hr/hr/pages/traffic_and_security/documents/14-brojanje-prometa, 30.09.2018.
- [30] Izvještaj br.: 2740-405/06, Izvještaj o kontrolnim ispitivanjima asfaltnih radova izvedenih na raskrižju Vukovarske avenije i izgradnji Sveučilišne aleje do ulice Lavoslava Ružičke, IGH d.d., Zagreb, lipanj 2006.
- [31] Hrvatske Ceste i Hrvatske Autoceste: Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Institut Građevinarstva Hrvatske., Zagreb, lipanj 2001.
- [32] HRN EN 12697-1 Bitumenske mješavine – Metode ispitivanja za asfalt proizveden vrućim postupkom – 1. dio: Topivi udio veziva
- [33] HRN EN 12697-30 Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja za asfalt proizveden vrućim postupkom – 30. dio: Priprema uzorka udarnim zbijačem
- [34] HRN EN 12697-5 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 5. dio: Određivanje gustoće asfaltnih mješavina
- [35] HRN EN 12697-6 Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja za asfalt proizveden vrućim postupkom – 6. dio: Određivanje gustoće asfaltnih uzorka
- [36] HRN EN 12697-8 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 8. dio: Određivanje šupljina u asfaltnim uzorcima
- [37] Ramljak, Z.: Izvještaj o proizvodnji, ugradnji i ispitivanju površine asfaltnog sloja načinjenog od asfalta tipa HS 8 K (SMA) VT(s) M sa doziranom pulveriziranom gumom ugrađenog u kolničku konstrukciju u Lučićevoj ulici u Zagrebu, Ramtech d.o.o., Zagreb, prosinac 2006.
- [38] Ramljak, Z.: Primjena pulveriziranih otpadnih pneumatika u asfaltnoj cestogradnji, Ramtech d.o.o., Sesvetski Kraljevec, svibanj 2005.
- [39] HRN EN 12697-36 Bitumenske mješavine - Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 36. dio: Određivanje debljine asfaltnih slojeva u kolniku
- [40] HRN EN 12697-22 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 22 dio: Kolotraženje

- [41] HRN EN 13036-4:2012 Površinska svojstva cesta i aerodromskih operativnih površina – Metode ispitivanja - 4. dio: Metoda mjerenja otpornosti površine na klizanje: Ispitivanje klatnom
- [42] HRN EN 13036-1 Površinska svojstva cesta i aerodromskih operativnih površina – Metode ispitivanja – 1. dio: Mjerenje dubine makrotekture površine kolnika volumetrijskim postupkom
- [43] AGPT/T450 Determination of the International Roughness Index IRI using ARRB Walking Profiler
- [44] HRN EN 13036-6 Površinska svojstva cesta i aerodromskih operativnih površina – Ispitne metode - 6. dio: Mjerenje poprečnih i uzdužnih profila u području valnih duljina ravnosti i megatekture
- [45] HRN EN 13108-5:2016 Bitumenske mješavine – Specifikacije materijala – 5. dio: SMA
- [46] HRN EN 933-1 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sijanja
- [47] HRN EN 933-2 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 2. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Ispitna sita, nazivne veličine otvora
- [48] HRN EN 12697-34 Bitumenske mješavine – Metode ispitivanja za asfalt proizveden vrućim postupkom – 34. dio: Marshallovo ispitivanje
- [49] HRN EN 12697-12 Bitumenske mješavine – Metode ispitivanja-12. dio: Određivanje osjetljivosti asfaltnih uzoraka na vodu
- [50] HRN EN 12697-23 Bitumenske mješavine – Metode ispitivanja - 23. dio: Određivanje vlačne čvrstoće asfaltnih uzoraka neizravnom vlačnom metodom
- [51] HRN EN 12697-26 Bitumenske mješavine - Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom - 26. dio: Krutost